

Software para la corrección de las posibles imperfecciones existentes en los sensores de imagen

- 1) Alfonso Martín Marcos. Dr. Ingeniero de Telecomunicación.
Universidad Politécnica de Madrid. España amartin@diac.upm.es
- 2) Francisco López Ferreras. Dr. Ingeniero de Telecomunicación.
Universidad de Alcalá. España francisco.lopez@uah.es
- 3) Pilar Martín Martín. Dr. Ingeniero de Telecomunicación.
Universidad de Alcalá. España p.martin@uah.es

Resumen

En este trabajo se indica la técnica utilizada para conseguir una buena corrección de las posibles deficiencias presentadas por los dispositivos de adquisición de imágenes.

Se presenta la herramienta informática que ha sido desarrollada para este fin y que permite localizar la mejor corrección posible. También se puede evaluar, tanto objetiva como subjetivamente, la mejora conseguida con la corrección.

Abstrac

This paper presents a technique in order to get a optimal correction of possible deficiencies presented by image acquisition devices.

A software developed by the author is described. This tool obtains the optimal feasible correction. It also evaluates the improvement achieved both in objective and subjective terms.

1. Introducción

Cuando un dispositivo electrónico analiza una imagen, la descompone en pixels y de cada uno de ellos obtiene tres valores. Estos tres valores son los componentes del color correspondiente a ese pixel, expresados en el Espacio Colorimétrico en el que se esté trabajando. Un Espacio Colorimétrico se encuentra completamente definido por los tres colores primarios utilizados en la reproducción de los colores y por el blanco de referencia, que es el color para el cual los tres componentes son iguales.

Esos tres valores serán transportados al dispositivo de presentación de la imagen y reproducirán metaméricamente al color original de ese pixel. Efectuando esta operación para todos y cada uno de los pixels de la imagen, se podrá reproducir metaméricamente la imagen original.

Para obtener los tres componentes del color de un pixel, se utiliza la distribución espectral de energía emitida por él. El dispositivo analizador deberá disponer de tres subsistemas y cada uno de ellos deberá poseer un filtro óptico para ponderar

adecuadamente la distribución espectral recibida. Posteriormente, con la adecuada integración interna, generará una señal eléctrica representativa del componente que trata de obtener. [1]

Para el caso de la TV americana (Rec. 470 UIT-R), el blanco de referencia (W) es el blanco C. Las posiciones cromáticas de los tres colores primarios (R, G, B), así como del blanco de referencia, son los que se encuentran indicados en la figura 1, expresados sobre el diagrama de cromaticidad xy del CIE. [2]

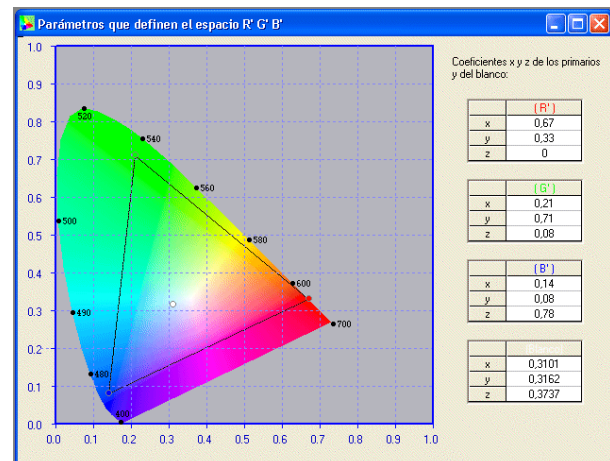


Figura 1. Especificaciones del Espacio de trabajo

Para la obtención de los componentes de un color en este Espacio Colorimétrico, las funciones de transferencia de los filtros ópticos intercalados entre la recepción de la energía emitida por el pixel y cada uno de los tres dispositivos sensores, deben corresponderse con las curvas de mezcla correspondientes a ese Espacio y son las que se encuentran representadas en la figura 2.

La energía luminosa incidente, queda caracterizada por su distribución espectral de energía $P(\lambda)$. Esta distribución espectral incide sobre el dispositivo captador de la imagen y en paralelo se distribuye sobre los tres canales, definidos por sus

funciones de transferencia $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ y $B(\lambda)$. Los valores de los componentes, para esa distribución espectral de energía, vienen dados por (1):

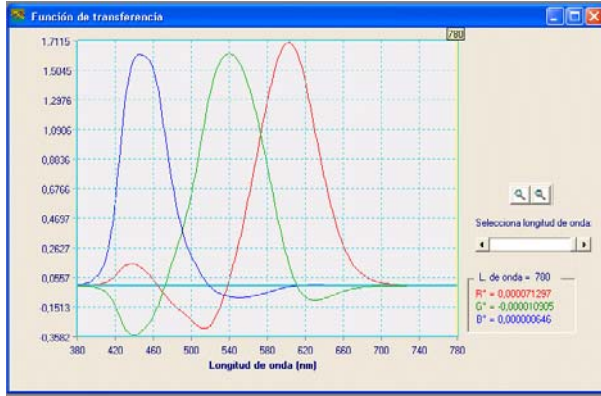


Figura 2. Características del sensor ideal

$$\begin{aligned} R &= \int P(\lambda) R(\lambda) d\lambda \\ G &= \int P(\lambda) G(\lambda) d\lambda \\ B &= \int P(\lambda) B(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

Si el dispositivo captador presentase esas tres funciones de transferencia, los valores obtenidos se corresponderían exactamente con los valores de los componentes. En la realidad es prácticamente imposible conseguir esas características en los filtros, tanto por los valores negativos de las funciones de transferencia como por los lóbulos secundarios presentados. Los fabricantes de dispositivos captadores de imagen intentan acercarse a esas curvas todo lo que puedan, siendo el ajuste de este aspecto el que consigue mayor o menor calidad cromática en los colores de la imagen reproducida.

Los valores conseguidos tecnológicamente en las funciones de transferencia de los filtros ópticos serán $R'(\lambda)$, $G'(\lambda)$, $B'(\lambda)$, diferentes de los correctos. En estas condiciones, los valores de los componentes obtenidos serán:

$$\begin{aligned} R' &= \int P(\lambda) R'(\lambda) d\lambda \\ G' &= \int P(\lambda) G'(\lambda) d\lambda \\ B' &= \int P(\lambda) B'(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

Cuanto mas se aproximen las funciones $R'(\lambda)$, $G'(\lambda)$, $B'(\lambda)$ a las funciones $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, $B(\lambda)$, mas se aproximarán los componentes obtenidos R' , G' , B' a los componentes ideales R , G , B . La coincidencia total nunca podrá ser conseguida. Inevitablemente, esta imposibilidad originará un error en la reproducción de los colores.

Se ha desarrollado un algoritmo que optimiza el acercamiento entre estos valores. Se efectúa una manipulación lineal sobre los

componentes generados por el dispositivo captador de la imagen, para tratar de aproximarse a los valores correctos que generaría un dispositivo ideal. El método de actuación del algoritmo es el indicado en la figura 3.

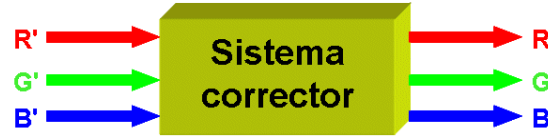


Fig. 3. Actuación del algoritmo corrector

Es imposible ajustar completamente todos los valores de salida para que coincidan con los deseados, dadas las infinitas posibilidades que se pueden presentar a la entrada. Es necesario establecer unos criterios para efectuar la corrección y dichos criterios pueden establecerse desde diferentes puntos de vista.

2. Método de corrección

Entre los valores de los componentes obtenidos por el dispositivo sensor y los que se van a conseguir después de la corrección, la única transformación lineal que es posible efectuar es a través de una matriz de dimensiones (3x3). Sobre ella solo se dispone de nueve parámetros, que pueden ser ajustados para optimizar la aproximación.

Matemáticamente, el efecto de la corrección puede expresarse:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 \\ m_7 & m_8 & m_9 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} \quad (3)$$

El criterio que se ha seguido para la localización de la matriz correctora es el de conseguir un ajuste perfecto para el color blanco. Con los seis grados de libertad que permanecen disponibles después de ese proceso, se intenta acercar en lo posible las curvas del dispositivo imperfecto a las que idealmente se deberían de conseguir.

Esta técnica de actuación parece bastante adecuada, puesto que en la Naturaleza los colores que se encuentran disponibles para ser utilizados, son obtenidos normalmente con fuentes de iluminación cercanas al blanco.

Esto condiciona que los colores a manejar normalmente son colores poco saturados (cerca del blanco), mientras que los colores con mucha saturación apenas aparecen en el mundo real. Debido a esta situación real, parece más lógico minimizar los errores para los colores que tienen una mayor probabilidad de aparición. [3]

El proceso de obtención de la matriz es bastante laborioso y se fundamenta en la aplicación del método de los mínimos cuadrados para la localización de los seis parámetros que quedan disponibles después de la optimización completa para el color blanco.

Si para el color blanco se anula el error y para los colores espectrales puros (máxima saturación) se minimiza el error, para los colores que se encuentren en situaciones intermedias (cercanos al blanco), el error se encontrará comprendido entre esas dos situaciones y por lo tanto será imposible mejorar estas condiciones.

3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos prácticamente, mediante el proceso indicado, cumplen ampliamente las expectativas previstas al diseñar el proceso.

Aunque inicialmente todo el cálculo relativo al diseño se realizó en MATLAB, cuando los resultados ya se encontraron disponibles, se implementó todo en C++, que ofrece una mayor velocidad de proceso en los cálculos y una presentación de los resultados mucho más vistosa.

Para valorar en este artículo la eficiencia del algoritmo desarrollado, se va a utilizar una cámara que presenta unas funciones de transferencia de los filtros ópticos que sean cómodas de obtener numéricamente y que aporten un gran contenido pedagógico, con vistas a la exposición en el ámbito universitario. Por desgracia que puede ser utilizada cualquier cámara real, sin ninguna limitación en la respuesta de sus filtros.

Las características de la cámara que se va a analizar, han sido obtenidas a partir de la cámara ideal, según la Norma americana NTSC. Se le han suprimido los lóbulos negativos (por otra parte imposibles de ser conseguidos físicamente en la realidad), así como también los lóbulos secundarios presentados en algunos lugares del espectro.

Las funciones de transferencia de la cámara a corregir son las indicadas en la figura 4, pudiendo observarse que se encuentran ligeramente separadas de la situación ideal, a la que se pretende llegar después de efectuar la corrección.

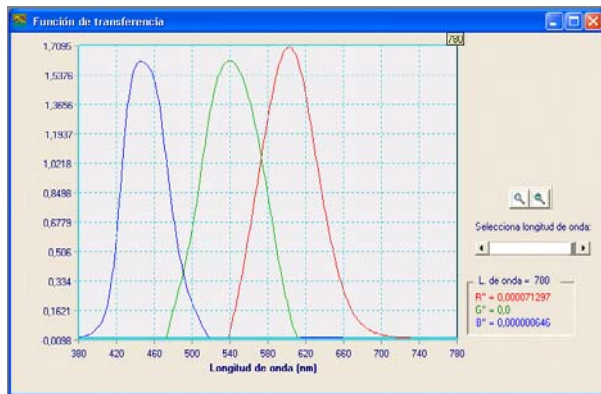


Fig. 4. Cámara dispuesta a ser corregida

Introduciendo esta cámara al proceso de corrección, la matriz correctora que se obtiene aplicando el algoritmo utilizado por nosotros, es:

$$M = \begin{bmatrix} 1.0116 & -0.0969 & 0.0224 \\ -0.0290 & 1.0114 & -0.1691 \\ -0.0043 & -0.0363 & 1.0041 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Aplicando esta matriz a todos y cada uno de los colores espectrales puros, se obtienen las funciones de transferencia ópticas correspondientes a la cámara corregida. Puede observarse que aunque dichas curvas no llegan a coincidir completamente con las curvas ideales, su acercamiento es considerable. Puede apreciarse gráficamente sobre la figura 5, en donde se representan simultáneamente las características de las dos cámaras, la conseguida después de la corrección y la cámara ideal.

En la figura se aprecia que después de la corrección incluso han aparecido partes negativas en las funciones de transferencia, imposibles de conseguir directamente con los filtros ópticos. Los valores alcanzados no llegan a alcanzar los valores deseados como ideales, pero el grado de acercamiento es muy grande.

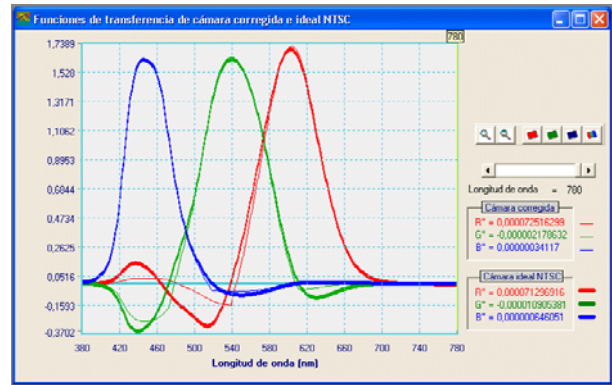


Fig. 5 Comparación entre lo conseguido y lo ideal

Aunque la visualización gráfica es bastante significativa y suministra mucha información, es conveniente establecer una valoración numérica de la separación existente entre los dos tipos de curvas, mediante un único parámetro. Este parámetro tomará el valor 0 cuando los dos conjuntos de las tres curvas coincidan completamente y será tanto mayor cuanto más se distancien.

La valoración numérica establecida para esta medida, se lleva a cabo a través de la magnitud definida como separación relativa entre curvas (SR), establecida a través de la expresión:

$$SR = \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} [(R_i - r_i)^2 + (G_i - g_i)^2 + (B_i - b_i)^2]}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} [R_i^2 + G_i^2 + B_i^2]}} \quad (5)$$

en donde R , G y B son las secuencias representativas de los valores ideales que se pretenden alcanzar y r , g y b son las

secuencias correspondientes a los valores a los que se ha logrado acceder, después del proceso de corrección. [4]

En el caso particular del ejemplo que se está considerando en este momento, la separación numérica SR, valorada según la expresión (5), arroja valores respectivos de 0,2346 (antes de la corrección) y 0,1519 después de que la corrección haya sido efectuada. Puede comprobarse que la mejora es bastante considerable.

Las valoraciones anteriores, tanto gráfica como numéricamente, aclaran perfectamente el comportamiento de la cámara de partida y la cámara corregida, para los colores espectrales puros. Los cálculos efectuados son válidos para establecer la separación entre curvas. Si la separación entre curvas corregidas e ideales fuese nula, la corrección sería perfecta para todos los colores, tanto espectrales puros como no espectrales puros. Cuando existe separación entre curvas, inevitablemente se comete error en la interpretación de los colores.

Es importante conocer el comportamiento de las cámaras, tanto sin corregir como corregida, para un color en concreto. Este color puede ser de una única longitud de onda o puede estar formado por una determinada distribución espectral de energía.

Si el color fuese espectral puro, a partir de los datos anteriores se pueden conocer tanto los componentes para la cámara sin corregir como para la cámara corregida y obviamente también los componentes que tiene idealmente. A partir de estos datos puede calcularse el error cometido en cualquier momento del proceso.

En la mayor parte de los casos, el color a considerar no es monocromático. En este caso es necesario averiguar una distribución espectral que metaméricamente corresponda a ese color y operar a partir de esa situación.

Como ejemplo, sobre el software diseñado a este efecto, se ha elegido un color cuyos coeficientes cromáticos sobre el diagrama de cromaticidad xy del CIE son $x = 0.2$ y $y = 0.3$, con luminancia subjetiva de valor 20.

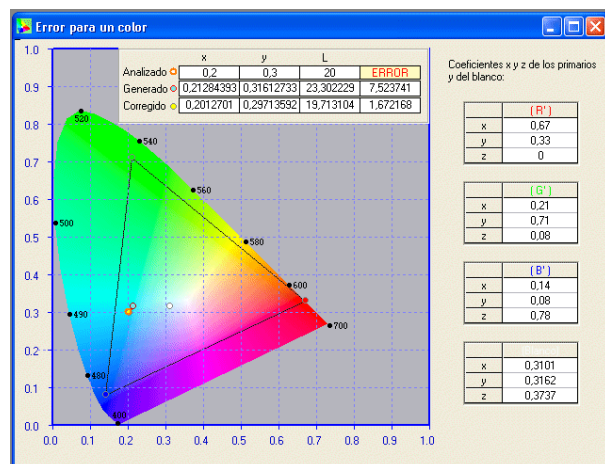


Fig. 6. Estudio del error para un color concreto

Para medir el error cometido para un color en concreto, se utiliza el Espacio CIELUV, en donde ya se tienen en cuenta las valoraciones subjetivas efectuadas por el ojo humano. En este Espacio, la separación entre dos colores viene dada por la expresión:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta U)^2 + (\Delta V)^2} \quad (6)$$

En la figura 6 se encuentra expuesta completamente la situación y por lo tanto es autoexplicativa: Si no se efectúa corrección, con la cámara analizada el error cometido para ese color toma el valor 7.52. Después de la corrección de la cámara, el error ya ha bajado hasta 1.67, que como puede apreciarse es ya una disminución muy importante. [5]

Puesto que es posible valorar el error que se comete para un color en concreto, también será posible, de forma iterativa, hacerlo para todos los colores que forman el universo cromático. Se pueden implementar diferentes valoraciones, de muy diversos tipos, cuyo resultado puede ser altamente ilustrativo.

Como ejemplo de una de estas valoraciones, puede ser interesante averiguar cual es el conjunto de colores para los que el error cometido se encuentra comprendido entre dos valores preestablecidos.

En el ejemplo que se va a utilizar seguidamente, se considera el conjunto de colores para los que, teniendo luminancia 20 (parámetro adicional a la información suministrada en el diagrama de cromaticidad), los errores se encuentren comprendidos entre los valores de 0 y 3.

Sobre la cámara sin corregir, el conjunto de los colores que cumplen esa premisa es el representado sobre la figura 7. Como errores inferiores a 0 no pueden existir, resulta obvio que los colores exteriores a la zona indicada en la figura, tienen un error superior a 3.

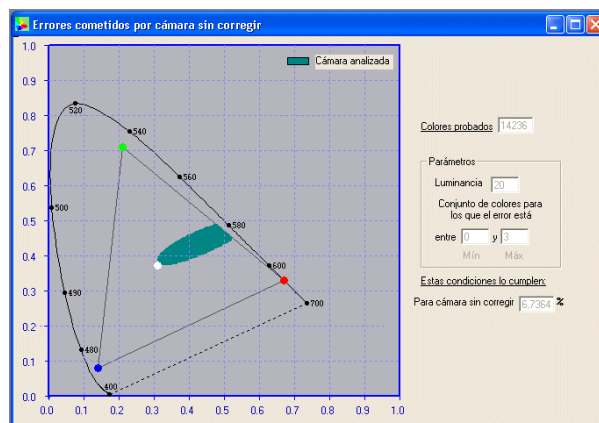


Fig. 7 Errores $0 < e < 3$ en la cámara analizada

En la figura también se indica (aunque pueda resultar difícil de observarse sobre ella) que solo el 6.7% de los colores cumplen esa premisa de errores inferiores a 3,.

Al efectuar la corrección sobre la cámara, es posible indagar sobre la zona que ha experimentado mejora. Manteniendo el mismo margen de errores anterior (para poder establecer cómodas comparaciones), se obtiene la figura 8, en donde se presenta el mismo concepto de la figura 7, pero ahora sobre la cámara ya corregida.

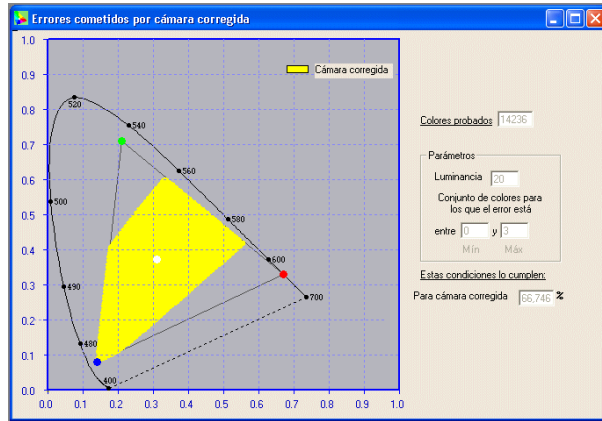


Fig. 8. Errores $0 < e < 3$ para cámara corregida

Sobre la figura puede apreciarse la gran mejora obtenida, puesto que la zona correspondiente a los errores comprendidos entre 0 y 3 abarca ya a un 66.7% del conjunto total de colores posibles.

En el estudio de las características presentadas por las dos cámaras, la analizada y la corregida, puede ser interesante averiguar el comportamiento para todo el conjunto de colores posibles, obviamente dentro de la gama cromática establecida por los colores primarios, que es la única posible de representar. A tal fin se ha establecido un conjunto de colores uniformemente repartidos por el diagrama de cromaticidad, siendo este número ajustable (precisión) a fin de acortar o alargar el tiempo de cálculo necesario para la valoración.

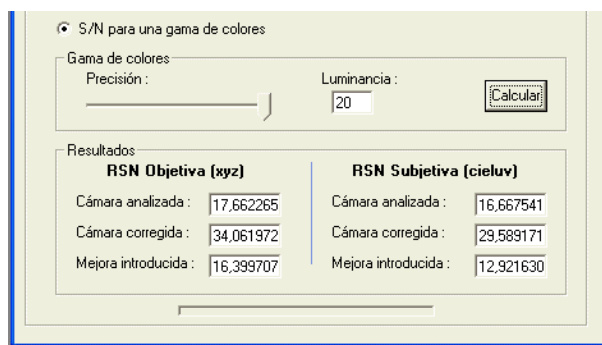


Fig. 9. Relación S/N para todo el conjunto de colores

Para cada uno de ellos se establece el valor de la relación señal/ruido y luego se hace la media para todos los colores implicados en la valoración. En la figura 9 se ofrecen los resultados, implicando a todos los colores del diagrama de cromaticidad, con una precisión tal que, en el caso de la figura, se utilizan en el proceso de cálculo un total de 14263 colores. El

resultado permanece casi inalterable, independientemente del número de colores utilizados en el proceso, siempre que no se descienda a una población muy pequeña de colores a considerar. [6]

Las valoraciones numéricas resultan totalmente esclarecedoras, pero también se le ha dotado al software la posibilidad de efectuar valoraciones visuales sobre imágenes concretas, para establecer visualmente como se apreciarían por el ojo humano si se utilizase directamente la señal generada por la cámara o se utilizase la señal después de la corrección.

Obviamente, para valorar este aspecto es necesario disponer de un dispositivo de presentación que acepte imágenes cromáticas, porque precisamente en ese aspecto se encuentra la diferencia entre ellas.

En las tres siguientes figuras se representan secuencialmente, la imagen original, la reproducida con la cámara analizada y la reproducida con la cámara corregida. Sobre ellas, mucho mejor si tuviesen un tamaño relativamente grande, puede apreciarse visualmente la diferencia existente.



Fig. 10. Imagen original



Fig. 11. Imagen obtenida sin corregir



Fig. 12. Imagen corregida

Para establecer numéricamente el grado de parecido entre dos imágenes monocromas, se pueden utilizar gran cantidad de valoraciones, pero la más extendida es la PSNR (peak signal noise relation), definida a través de la expresión:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2 M N}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x(i,j) - y(i,j)]^2} \quad (7)$$

siendo $x(i,j)$ la imagen original y siendo $y(i,j)$ la imagen que se compara con la original, entendiéndose la diferencia entre ellas como el error (o ruido) existente en el proceso. Si la imagen es cromática, se extiende el sumatorio al conjunto de los tres planos de la imagen.

Para el caso concreto de las imágenes utilizadas en este ejemplo, el cálculo de este parámetro arroja un valor de 18.62 dB. para la imagen generada por la cámara analizada y un valor de 21.98 dB. para la imagen de la cámara corregida, lo que proporciona un aumento de calidad de unos 3.35 dB.

4. Conclusiones

Observando tanto los resultados objetivos como los subjetivos, puede apreciarse que el algoritmo diseñado y utilizado en la implementación del software presentado, logra obtener unos resultados muy satisfactorios. Mediante el proceso de optimización establecido, externamente al dispositivo captador de imagen y de una forma muy sencilla, es posible corregir en gran medida las anomalías cromáticas cometidas por los sensores captadores de imágenes y debidas a la imperfección de los filtros ópticos colocados en cada uno de los tres canales de extracción de componentes.

Mediante la aplicación software desarrollada, se ha podido comprobar que es posible valorar completamente todo este tipo de situaciones, tanto para cámaras establecidas a voluntad con vistas a valoraciones didácticas, como cámaras o dispositivos sensores reales, de los que se conozca sus funciones de transferencia ópticas y que en definitiva son las que condicionan el proceso de obtención de los componentes.

Bibliografía

- [1] Martín Marcos A. *Colorimetría*. Madrid. Ciencia 3. 2000
- [2] Recomendación 470-6 de UIT-R
- [3] Martín Marcos A. *Optimización de un algoritmo para la corrección de las deficiencias cromáticas presentadas por los dispositivos captadores de imagen*. Ph.D thesis. Universidad de Alcalá. 2001
- [4] Wyszecki G. Stiles WS. *Color Science: Concepts and Methods. Quantitative Data and Formulae*. New York. John Wiley. 1982
- [5] Sproson W.N. *Colour Science in Television and Display Systems*. Bristol. Adam Hilger. 1983.
- [6] Martín Marcos A. *Signal Processing, Communications and Computer Science*. Atenas. Nikos Mastorakis Ed. 2000.